Journal of Agricultural Machinery
Vol. 9, No. 1, Spring - Summer 2019, p. 31-48

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۹، شماره ۱، نیمسال اول ۱۳۹۸، ص ۴۸-۳۱

بررسی پخش ریزدانه‌ها درون سیلو در شرایط مختلف پرکردن

آرش نورمحمدی مقدمی[۱]- داریوش زارع[۲*]- شهداد کامفیروزی[۳]- عبدالعباس جعفری[۲]- محمدامین نعمت اللهی[۴]- رضا کمالی[۵]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۲۸

چکیده

هنگام پر شدن سیلوها، ذرات ریزتر در زیر نقطه پر شدن تجمع می‌یابند و این باعث می‌شود که در فرآیند هوادهی که متعاقباً انجام می‌شود، انرژی بیشتری برای راندن هوا در مناطق با تراکم بالای ریزدانه‌ها صرف گردد. در این پژوهش، توزیع دانه‌های شکسته ذرت و مواد خارجی (BCFM) در سطوح مختلف پارامترهای تأثیرگذاری چون، محتوای اولیه ریزی دانه‌ها (initial BCFM) در سه سطح ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد، دبی ورودی محصول در سه سطح ۰/۵، ۱ و ۱/۵ لیتر بر ثانیه و قطر لوله پرکننده در سه سطح ۸۴، ۱۰۵ و ۱۲۰ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌گیری با استفاده از یک رویکرد جدید، در راستای شعاعی و عمودی در یک سیلوی آزمایشی انجام پذیرفت. نتایج نشان داد که با افزایش فاصله از مرکز سیلو مقدار ریزدانه‌ها کاهش می‌یابد و همچنین با افزایش محتوای اولیه ریزدانه‌ها، افزایش دبی ورودی محصول و افزایش قطر لوله پرکننده، پخش ریزدانه‌ها یکنواخت‌تر می‌گردد. اما با افزایش ارتفاع سطح محصول در داخل سیلو، پخش یکنواخت ریزدانه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین یک مدل غیرخطی برای پیش‌بینی مقدار BCFM در راستای شعاعی و عمودی ارائه و بر اساس شاخص‌های آماری از قبیل، R^2، χ^2، $RMSE$ و $MRDM$ ارزیابی گردید که به‌ترتیب مقادیر ۰/۹۴، ۱/۱۴، ۱/۰۶، ۱۱/۳۹ برای شاخص‌های آماری مذکور به‌دست آمد و مشخص شد که مدل ارائه شده با داده‌های تجربی همخوانی دارد.

واژه‌های کلیدی: الگوی پخش ریزدانه‌ها، جریان مواد، ذرت، روش پرکردن، سیلو، مدل غیرخطی

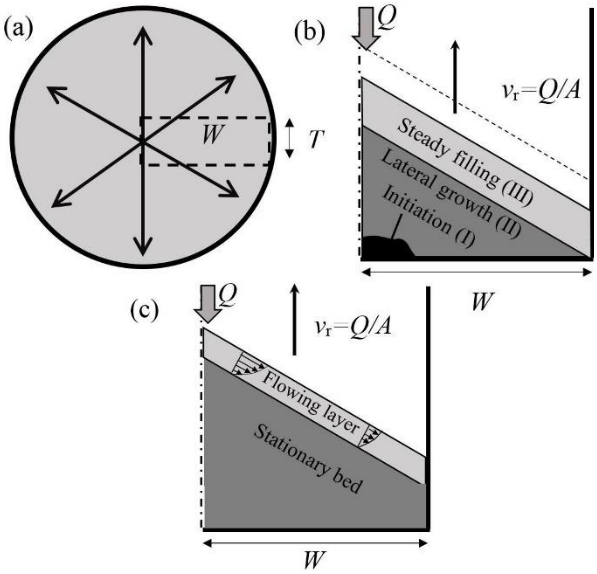
مقدمه

با توجه به نقش پررنگ ذرت در تأمین نیاز انسان و حیوان و کشت روزافزون آن در ایران، ارائه روش‌های نوین جهت نگهداری هر چه بهتر این محصول همواره از جایگاه ویژه‌ای نزد محققان برخوردار بوده است (Abbasi *et al.*, 2014). در حین فرآیند پرکردن[۶] سیلو محصولات دانه‌ای، کپه‌ای مخروطی شکل در درون این سیلوها تشکیل می‌شود به‌طوری که مواد در حال سقوط، هنگامی که بر روی این کپه ریخته می‌شوند به صورت شعاعی در درون یک لایه موسوم به لایه جریان[۷] در تمامی جهات (شکل ۱ (a)) به پایین کپه و به سمت دیواره‌های سیلو هدایت می‌شوند (Fan *et al.*, 2017). تحقیقات نشان داده است که حین پرکردن سیلوهایی که از وسط پر می‌شوند، ریزدانه‌ها که شامل دانه‌های شکسته و برخی مواد خارجی می‌باشند در مرکز سیلو تجمع می‌یابند (Stephens and Foster, 1976). ذرات بزرگ‌تر به دلیل جرم بیشتر و اصطکاک سطحی کمتر نسبت به ذرات کوچک‌تر، تمایل به حرکت به سمت دیواره سیلو دارند، در حالی که ذرات کوچکتر در مرکز توده دانه باقی می‌مانند. از نقطه نظر دیگر، ریزدانه‌ها حین انتقال در درون لایه جریان، در حفره‌های موجود در لابه‌لای ذرات بزرگ‌تر باقی می‌مانند در حالی که ذرات بزرگتر عمدتاً به سمت دیواره سیلو هدایت می‌شوند. سطح شیبدار کپه تشکیل شده، مانند یک غربال عمل می‌کند که بر اثر آن ذرات کوچکتر به لایه‌های زیرین خود نفوذ می‌کنند. این پدیده به اثر غربال‌گری[۸] موسوم است (Schulze, 2008). اثر مذکور باعث می‌شود که ستونی از ریزدانه‌ها در مرکز سیلو تشکیل شود (Noyes *et al.*, 2002). تمرکز ریزدانه‌ها در مرکز سیلو باعث پخش غیریکنواخت هوا در فرآیند هوادهی می‌گردد.

در چنین شرایطی نرخ جریان هوا در مرکز سیلو کمتر از اطراف آن می‌گردد (Bartosik and Maier, 2006). با توجه به درجه حرارت بالا و شرایط مرطوب دانه‌ها در سیلو، خطر ایجاد کپک‌ها و حشرات و سایر آلودگی‌ها در چنین شرایطی اجتناب‌ناپذیر است.

۱، ۳ و ۴- به‌ترتیب دانشجوی دکتری، دانشیار، دانشجوی کارشناسی و استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز
۵- استاد، گروه مهندسی مکانیک حرارت و سیالات، دانشکده مکانیک، دانشگاه شیراز
(*- نویسنده مسئول: Email: dzare@shirazu.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v9i1.69749

6- Filling process
7- Flowing layer
8- Sifting effect



شکل ۱- (a) نمای بالا از یک کپه سه بعدی تشکیل شده در داخل سیلو. پیکان‌ها جریان مواد و مستطیل نقطه‌چین یک کپه دو بعدی را نشان می‌دهد. (b) نمای کناری از یک کپه دو بعدی که با سرعت $v_r = Q/A$ در حال بالا آمدن است (Fan *et al.*, 2012). (c) نمای کناری از کپه دو بعدی و پروفیل سرعت جریان مواد (Fan *et al.*, 2013)

Fig. 1. (a) Top view sketch of a 3D heap, where arrows indicate flow of material. Dashed box shows top view of the quasi-2D heap used here. (b) Side view sketch of a quasi-2D heap rising at the rise velocity $v_r = Q/A$, (Fan *et al.*, 2012). (c) Side view of a 2D heap and velocity profile of flowing material (Fan *et al.*, 2013)

بـرای طراحـی بهینـه فرآینـدهای صـنعتی از قبیـل هـوادهی محصولات دانه‌ای سیلو شده، پرکـردن سـیلوها و هـر فرآینـدی کـه شامل انتقال مواد است، لازم است که مطالعه پخـش ریزدانـه‌هـا در دستور کار قرار گیرد Fan و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از یـک مـدل شبه دو بعـدی[1] بـه مطالعـه جریـان مـواد حـین پرشـدن یـک سـیلو آزمایشگاهی پرداختند (شکل ۱). W ،T و Q بـه‌ترتیـب نشـان‌دهنـده فاصله بین دیواره‌های جانبی دستگاه، عرض دسـتگاه و دبـی حجمـی جریان ورودی مواد به داخل سیلو هستند. همانطور که در شکل ۱ (b) نشان داده شده است، پر شدن یک مخزن یا سیلو شامل سـه مرحلـه است. در مرحله یک (شکل‌گیری اولیه[2])، مواد در حـال سـقوط بعـد از رسیدن به ته مخزن تشکیل یک کپه نامنتظم می‌دهند. کمـی بعـد از آن، کپه به‌صورت جانبی گسترش می‌یابد و قاعده آن بزرگتر می‌شـود تا زمانی که به دیواره سیلو برسد (مرحلـه دوم، گسـترش جـانبی[3]). در مرحله سوم (پرشدن پایا[4])، سطح کپه به‌طور پیوسته بـا سـرعت ثابـت (v_r) به سمت بالا حرکت می‌کنـد. شـکل ۱ (c) نشـان مـی‌دهـد کـه سرعت جریان در درون لایه جریـان بـه‌طـور خطـی در طـول مسـیر حرکت کاهش می‌یابد و در نتیجـه یـک گرادیـان سـرعت در جهـت جریان پدید مـی‌آیـد (Fan *et al.*, 2013). طبـق مطالـب یـاد شـده، می‌توان نتیجه گرفت که سرعت مواد در لایه جریان می‌توانـد پخـش ریزدانه‌ها را تحت تأثیر قرار دهـد. Jayas و همکـاران (۱۹۸۷) میـزان پخش ریزدانه‌ها و پوسته‌های موجود در یک سیلوی کلزا را کـه بـا دو روش پرکردن پر شده بود مورد بررسی قرار دادند. فرآیند پرکردن سیلو با دو روش ۱- پرکردن توسط یک لوله واقع در مرکز[5] و بالای سیلو و ۲- توسط یک پخش‌کن[6] مخروطی صورت پذیرفت. نتایج نشـان داد که استفاده از پخش‌کن دانه منجر به بهبود اندکی در پخش یکنواخت ریزدانه‌ها شد. نویسندگان همچنین یـک معادلـه درجـه دوم را بـرای پخش ریزدانه‌ها پیشنهاد دادند. به دلیـل مشـکلات عدیـده‌ای کـه در کنترل شرایط آزمایشگاهی وجود داشت، اثرات پارامترهای دیگر مانند محتوای اولیه ریزدانه‌ها[7]، دبی ورودی محصول و قطر لوله پرکننـده را (بـرای حالـت پرکـردن از وسـط) در پخـش ریزدانـه‌هـا در نظـر نگرفتنـد. Shinohara و همکـاران (۲۰۰۱) اثـرات پارامترهـا ماننـد

1- Quasi-two-dimensional apparatus
2- Initiation
3- Lateral growth
4- Steady filling

5- Central spout
6- Spreader
7- Initial fine content

محتوای اولیه ریزدانه و دبی ورودی محصـول را حـین پرکـردن یـک مخزن مخروطی شکل دو بعدی بررسی کردند. نتـایج نشـان داد کـه میزان پخش ریزدانه‌ها با افزایش محتوای اولیه ریزدانه و افزایش دبی پخش ریزدانه‌ها یکنواخت‌تر می‌شود. Schulze (۲۰۰۸) اظهار داشـت که هرچه دبی ورودی محصول به داخل سیلو افزایش یابد لایه جریان ضخیم‌تر می‌شود. بنابراین، ذرات کوچک‌تر قبـل از اینکـه بتواننـد بـه لایه‌های زیرین خود نفوذ کنند، به سـمت دیـواره‌هـای سـیلو هـدایت می‌شوند (در فاصله دورتری از مرکز سیلو قرار می‌گیرنـد). Engblom و همکـاران (۲۰۱۲) بـه بررسـی پخـش ذرات شـن و ماسـه حـین فرآیندهای پرکردن و خالی کردن پرداختند و در این مورد مـدل یـک ابعادی ارائه دادند. پارامترهای مـوثر در پخـش ذرات در طـی فرآینـد پرکردن، درصد جرمی ذرات، نسبت اندازه ذرات (درشت/ ریز)، فاصـله سقوط آزاد، قطر سیلو و قطر لوله پرکننده بود. مدل ارائه شده با نتـایج تجربی همخوانی خـوبی داشـت. Combarros Garcia و همکـاران (۲۰۱۵) به بررسی پخش ذرات شن و ماسه در یک سیلو آزمایشـی در طی فرایند پرکردن و تخلیه پرداختند. پخش ذرات در امتداد عـرض و ارتفاع سیلو مورد بررسی قرار گرفت. آزمایشات نشان داد که که تمرکز ذرات درشت یک تابع درجه دوم از عـرض سـیلو اسـت و بـه‌صـورت خطی با ارتفاع سیلو افزایش می‌یابد. با مروری بـر مطالعـات گذشـته، خلاء یک تحقیق که به بررسی سه بعدی پخش ریزدانه‌هـا در امتـداد شعاعی و عمودی یک سیلو ذخیره‌کننده مواد دانه‌ای کشاورزی تحـت تأثیر پارامترهای تأثیرگذاری چون، محتوای اولیه ریزی دانـه‌هـا، دبـی ورودی محصول و قطر لوله پرکننده ورودی احساس می‌گردد. با توجه به مطالب یاد شده اهداف این تحقیق عبارتند از:

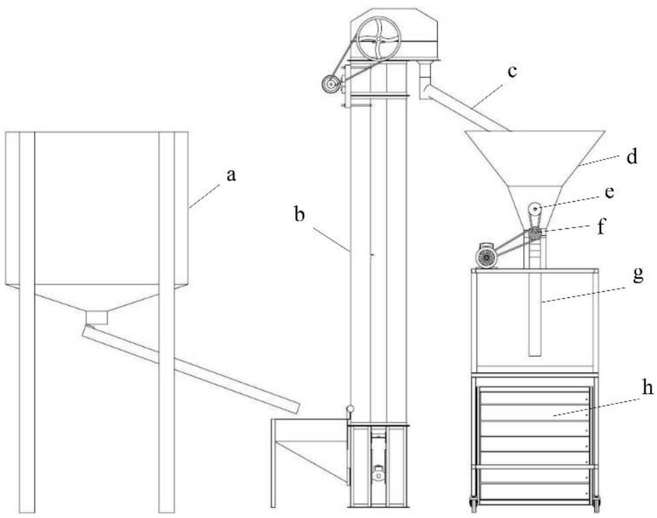
الف) بررسی پخش ریز دانه‌ها در یک سـیلو آزمایشـگاهی تحـت تأثیر پارامترهای تأثیرگذاری چون، محتـوای اولیـه ریزدانـه‌هـا، دبـی جریان ورودی محصول و قطر لوله پرکننده ورودی

ب) ارائه یک مدل برای تعیین میزان ریزدانه‌ها در راستای شعاع و ارتفاع سیلو

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی

شکل ۲ تجهیزات آزمایشگاهی طراحی و ساخته شـده در بخـش مهندسی بیوسیستم دانشگاه شیراز را نشان مـی‌دهـد کـه در تحقیـق حاضر مورد استفاده قرار گرفته است. این تجهیزات شامل یک مخـزن اصلی دانه، بالابر، مخزن ذوزنقه‌ای شـکل، یـک سـیلو آزمایشـگاهی می‌شدند. بالابر برای انتقال مواد از مخزن اصلی به مخزن ذوزنقـه‌ای استفاده می‌شد. برای کاهش خطا در اندازه‌گیری، دانه‌های ذرت (ذرت سالم، ذرت شکسته و مواد خارجی) بایـد در داخـل مخـزن ذوزنقـه‌ای به‌خوبی مخلوط شوند. برای این منظور، یک لوله دو راهه در خروجـی بالابر (جهت تقسیم جریان مواد به دو جریان هنگام پرکـردن مخـزن ذوزنقه‌ای) نصب شد. علاوه بر این، یک همزن نیز به‌صورت افقـی در کف مخزن ذوزنقه‌ای قـرار داده شـد. دبـی خروجـی مـواد از مخـزن ذوزنقه‌ای توسط یک مکانیزم غلتکی شیاردار کنترل می‌گردیـد. سـیلو آزمایشگاهی (شکل ۳) شامل هفت حلقه بود کـه بـا اسـتفاده از یـک شاسی بر روی یکدیگر قرار می‌گرفتند. فاصله عمودی بین حلقه‌هـا در حدود ۱۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. ارتفاع و قطر هر حلقه به‌ترتیـب ۰/۱۴ و ۱ متر بود.



شکل ۲– تجهیزات آزمایشگاهی (a) مخزن اصلی، (b) بالابر، (c) لوله دوراهه، (d) مخزن ذوزنقه‌ای، (e) محور همزن، (f) محور مکانیزم غلتکی شیاردار، (g) لوله پرکننده، (h) سیلو آزمایشگاهی متشکل از هفت حلقه

Fig. 2. Experimental set up (a) Main container, (b) Elevator, (c) Y-Shaped pipe, (d) Trapezoidal container, (e) Agitator, (f) Fluted roller mechanism, (g) Fill pipe, (h) Pilot scale silo consist of seven rings

روند انجام آزمایش‌ها

مطالعه موردی در این تحقیق ذرت دانه‌ای رقم ۷۰۴ بود که از یک موسسه کشاورزی واقع در شهرستان شیراز تهیه گردید. مطابق با استاندارد (ASABE, 2008) رطوبت اولیه ذرت در یک آون آزمایشگاهی (گرمایش در دمای ۱۰۳ درجه سلسیوس به مدت ۷۲ ساعت) اندازه‌گیری شد. رطوبت اولیه ذرت ۰/۵±۱۴ گزارش گردید. از شاخص BCFM (ذرت شکسته و مواد خارجی) برای تعیین میزان ریزدانه‌ها استفاده گردید. BCFM مقدار موادی است که از یک الک متشکل از سوراخ‌های دایره‌ای با قطر ۴/۸ میلی‌متر عبور می‌کند. در این مطالعه، از روش دستی برای تعیین میزان ریزدانه‌ها استفاده گردید (USDA, 2013). آزمایش‌ها در سه سطح ۵، ۷/۵ و ۱۰درصد برای محتوای اولیه ریزدانه‌ها (BC_I)، سه سطح ۸۴، ۱۰۵ و ۱۲۰ میلی‌متر برای قطر لوله پرکننده (D_F) و سه سطح ۰/۵، ۱ و ۱/۵ لیتر بر ثانیه برای دبی جریان ورودی محصول (Q) انتخاب شدند. آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شد. با درنظر گرفتن تمام سطوح تیمارها و تکرارها جمعاً ۸۱ تست انجام شد. برای تنظیم میزان BC_I قبل از انجام آزمایش‌ها، دانه ذرت با درصد مشخصی از ریزدانه‌ها مخلوط می‌شد. در میان پارامترهای فیزیکی تأثیرگذار بر پخش ریزدانه‌ها، دانسیته توده‌ای[1] و زاویه انباشتگی[2] برای هر سه سطح BC_I اندازه‌گیری شد (جدول ۱). همچنین قطر کره معادل دانه ذرت (با اندازه‌گیری صد عدد دانه ذرت سالم) با استفاده از یک کولیس دیجیتال (USA, Neiko, model: 01409A) با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر طبق رابطه (۱) محاسبه گردید (Mohsenin, 1985):

$$D_g = (L_g W_g T_g)^{1/3} \qquad (۱)$$

که D_g، L_g، W_g و T_g به‌ترتیب قطر کره معادل، طول، عرض و ضخامت دانه ذرت می‌باشند. قطر کره معادل دانه ذرت سالم ۰/۸۸±۷/۸ میلی‌متر به‌دست آمد. اندازه‌گیری دانسیته توده‌ای مطابق با روشی که Stroshine (۲۰۰۴) بیان داشته انجام پذیرفت. در ابتدا مقداری ذرت با BC_I مشخص در داخل یک بشر با حجم مشخص ریخته می‌شد. سپس با استفاده از یک تخته چوبی صاف سطح ذرت ریخته شده در بشر مسطح می‌گردید (به‌گونه‌ای که تخته چوبی در تماس با لبه بشر حرکت داده می‌شد). دانسیته توده‌ای با تقسیم وزن ذرت موجود در بشر بر حجم بشر محاسبه می‌شد. برای اندازه‌گیری زاویه انباشتگی از یک جعبه چوبی مکعبی شکل استفاده شد. در داخل این مکعب یک ستون دایروی شکل با شعاع مشخص قرار داشت. بعد از اینکه جعبه مذکور با ذرت پر می‌شد یکی از دیواره‌های آن برداشته می‌شد. با این کار ذرت‌های موجود در مکعب تخلیه و فقط مقداری ذرت روی ستون دایروی شکل باقی می‌ماند. با دانستن شعاع ستون و اندازه‌گیری ارتفاع مخروطی شکل مواد روی ستون، زاویه انباشتگی محاسبه می‌گردید.

قبل از پرکردن سیلو، از یک نوار چسب برای درزگیری فاصله بین حلقه‌های استفاده شد تا از خروج مواد جلوگیری شود. برای تقسیم ستون مواد به هفت قسمت، پس از پرشدن سیلو، شش ورق جداکننده (شکل ۳) در فاصله بین حلقه‌ها (از پایین به بالا برای حفظ فشار بر لایه‌های پایین به علت وزن ستون مواد) به‌صورت کشویی وارد می‌شد. به دلیل شکل کپه مخروطی تشکیل شده در بالای سیلو، نمونه‌گیری برای اولین حلقه از بالا انجام نگرفت. همچنین برای جلوگیری از اثر مراحل شکل‌گیری اولیه و گسترش جانبی در کف مخزن پایین‌ترین حلقه نیز در آزمایش‌ها مد نظر قرار نگرفت. برای تعیین محل نمونه‌گیری در راستای شعاعی از یک راهنمای Y شکل (شکل ۴ و ۵ (b)) شامل ده حلقه کوچک استفاده گردید به‌صورتی که استوانه‌های نمونه‌برداری از طریق حلقه‌های این راهنما به داخل محصول وارد می‌شد. شکل ۵ (a) موقعیت نمونه‌گیری را در سیلو آزمایشی نشان می‌دهد. موقعیت هر نقطه نمونه‌گیری با دو عدد بدون بعد R (فاصله از مرکز سیلو که با تقسیم بر شعاع سیلو بدون بعد شده است) و Z (فاصله از کف سیلو که با تقسیم بر ارتفاع سیلو بدون بعد شده است) نشان داده می‌شود. در تحقیق حاضر میزان BCFM مربوط به هر موقعیت نمونه‌گیری با BC_L نشان داده می‌شود. لازم به ذکر است که گرچه نمونه‌برداری در سه تکرار انجام گردید، مقدار BC_L در نقاط نمونه‌برداری A، B و C (شکل ۵ (b)) میانگین BC_L سه نمونه است که در همان فاصله از مرکز قرار دارد. به‌عنوان مثال، مقدار BC_L در نقطه A به‌طور متوسط از سه نقطه نمونه‌برداری است که روی دایره A' واقع شده‌اند. با اجرای این روش، جریان مواد روی پشته تشکیل شده درون سیلو در سه جهت شعاعی در نظر گرفته خواهد شد. مواد داخل سیلندر نمونه‌گیری توسط یک مکنده تخلیه می‌شد و با استفاده از یک ترازوی دیجیتالی (GF-600، A & D Company، Japan، دقت ۰/۰۱ گرم) میزان ریزدانه‌های آن وزن و BC_L تعیین می‌شد. این روش برای سایر حلقه‌ها از بالا به پایین تکرار شد. این روش برای اولین بار در تعیین BC_L در جهت شعاعی و عمودی در یک سیلوی آزمایشی به‌کارگرفته شد. از مزایای این روش این است که نمونه‌گیری بدون ایجاد برهم خوردگی نقطه نمونه‌گیری انجام می‌شود. در روش‌هایی که با پراب نمونه‌برداری صورت می‌گیرد مشکل ایجاد برهم خوردگی در نقطه نمونه‌گیری وجود دارد که باعث خطا در آزمایش‌ها می‌شود.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

داده‌های به‌دست آمده از آزمایشات با استفاده از روش ANOVA

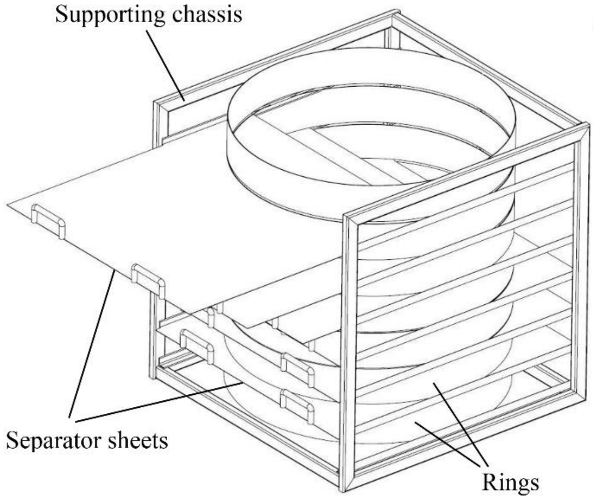
1- Bulk density
2- Angle of repose

و توسط یک نرم‌افزار آماری (SPSS, 2012) تجزیه و تحلیل شد. روش تحلیل بر اساس آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تیمار و سه تکرار در سطح معنی‌داری ۵٪ انجام گردید. همچنین از تکنیک رگرسیون غیرخطی برای ارائه مدل جهت پیش‌بینی الگوی پخش ریزدانه‌ها استفاده شد. توانایی پیش‌بینی مدل‌های مختلف در یک فرآیند سعی و خطا با استفاده از شاخص‌های آماری چون R^2، χ^2 میانگین مربعات خطا (*RMSE*) و میانگین انحرافات نسبی (*MRDM*) مورد ارزیابی قرار گرفت. مناسب‌ترین مدل بر اساس بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقدار χ^2، *RMSE* و *MRDM* انتخاب شد. شاخص‌های آماری مذکور در معادلات (۲) تا (۵) آمده‌اند.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی مواد مورد آزمایش در سه سطح از میزان محتوای اولیه ریزی دانه‌ها

Table 1- Physical properties of tested materials at three levels of initial BCFM

	محتوای اولیه ریزی دانه‌ها Initial BCFM (BC_I)			
	0%	5%	7.5%	10%
دانسیته توده‌ای (کیلوگرم بر متر مکعب) Bulk density (kg m^{-3})	718±1.6	732±1.8	741±1.8	751±1.9
زاویه انباشتگی (درجه) Angle of repose (°)	22.5	24.5	26.2	28



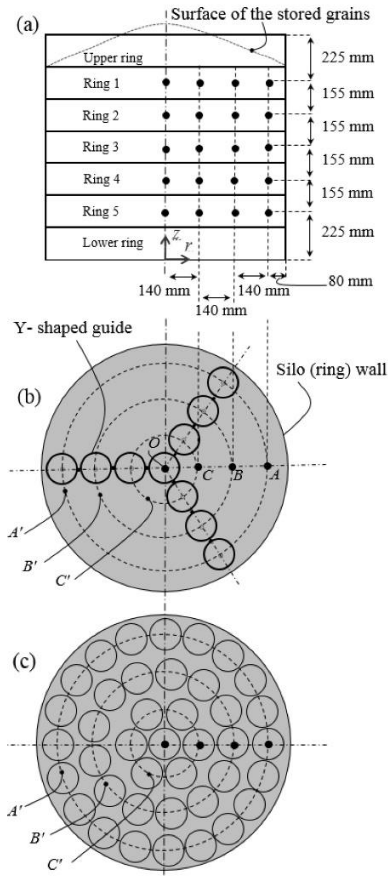
شکل ۳- طرح‌واره‌ای از سیلو آزمایشگاهی

Fig. 3. Schematic of the experimental silo



شکل ٤- راهنمای Y شکل و استوانه‌های نمونه‌برداری

Fig. 4. Y-shaped guide and sampling cylinders



شکل ۵– (a) موقعیت نقاط نمونه‌برداری، (b) و (c) نمای بالا از محل نقاط نمونه‌برداری

Fig. 5. (a) Sampling positions, (b) and (c) are top view of sampling positions

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(\phi_{ex,i} - \phi_{pr,i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(\phi_{ex,i} - \phi_{ex,a})^2}\right) \quad (۲)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\phi_{ex,i} - \phi_{pr,i})^2}{n - m} \quad (۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\phi_{ex,i} - \phi_{pr,i})^2} \quad (۴)$$

$$MRDM = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\left|\phi_{ex,i} - \phi_{pr,i}\right|}{\phi_{ex,i}}\right) \quad (۵)$$

که n تعداد مشاهدات، $\phi_{ex,i}$ iامین داده تجربی، $\phi_{pr,i}$ iامین داده پیش‌بینی شده، $\phi_{ex,a}$ میانگین داده‌های تجربی و m تعداد ثابت‌های مدل می‌باشد. در این مطالعه برای بررسی پخش ریزدانه‌ها در راستای شعاعی در یک ارتفاع مشخص (برای یک حلقه) از یک ضریب غیریکنواختی[1] (NUF) توسط Shinohara و همکاران (۲۰۰۱) نیز به‌کارگرفته شده بود استفاده شد:

$$NUF_R = \frac{\sigma}{BC_I} \quad (۶)$$

که

$$\sigma^2 = \frac{1}{3}\sum_{i=1}^{4}(BC_{L,i} - BC_I)^2 \quad (۷)$$

σ میزان انحراف BC_L در نقاط مختلف نمونه‌برداری ($BC_{L,i}$) از میزان محتوای اولیه ریزی دانه‌ها (BC_I) می‌باشد. همچنین برای یک سیلو (که شامل پنج حلقه می‌باشد) ضریب غیریکنواختی عبارت است از:

$$NUF_S = \frac{1}{5}\sum_{j=1}^{5} NUF_{R,j} \quad (۸)$$

نتایج و بحث

جدول ۲ نتایج حاصل از ANOVA را برای ارزیابی تأثیر تیمارها نشان می‌دهد. مشخص شد که اثرات همه پارامترها (همچنین همه تعاملات) در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که BC_L تابعی از BC_I، Q، D_F، R و Z است.

1- Nonuniformity factor

جدول ۲- نتایج حاصل از آنالیز واریانس برای ارزیابی تأثیر تیمارها

Table 2 - The results of ANOVA used for assessing the efficiency of main parameters

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی Degree of freedom	مجموع مربعات Sum of squares	میانگین مربعات Mean square	F value
BC_I	2	7462.171	3731.086	238353.790*
Q	2	447.219	223.609	14285.189*
D_F	2	50.214	25.107	1603.945*
Z	4	1051.478	262.869	16793.304*
R	3	18486.283	6162.094	393662.731*
Error	1078	16.874	.016	
Total	1620	209167.535		

* معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪

ضریب تغییرات: ۰/۰۱۲۰

* Significant at $P < 0.05$.

CV: 0.0120

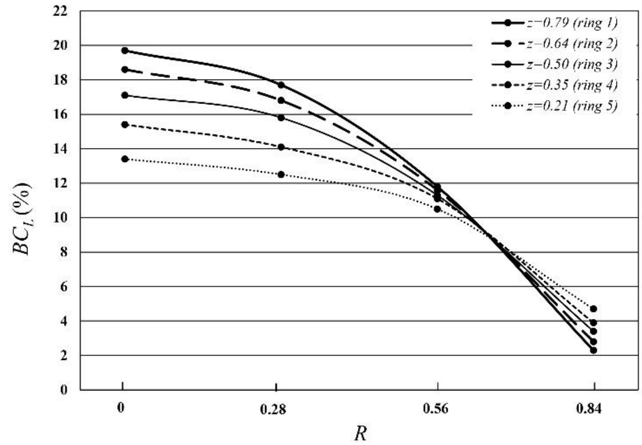
پخش ریزدانه‌ها در راستای شعاعی سیلو

شکل ۷ (a) نشان‌دهنده نمای سه بعدی یک قطاع از لایه جریان بر روی سطح شیبدار کپه (شکل ۷ (b)) در داخل یک سیلو است. همانطور که در شکل دیده می‌شود، لایه جریان مشابه جریان در یک "کانال به‌تدریج گسترش یافته"[1] است. همچنان‌که R افزایش می‌یابد، ضخامت لایه جریان کاهش می‌یابد و این امر موجب کاهش سرعت مواد در امتداد مسیر خود روی سطح کپه می‌شود. چنین مصداقی برای تحلیل دو بعدی لایه جریان وجود ندارد. شکل ۶ نمودار تغییرات BC_L را در طول شعاع سیلو (نقاط O به A در شکل ۵ (b)) برای حلقه ۱ (Z= ۰/۲۱) تا حلقه ۵ (Z= ۰/۷۹) نشان می‌دهد. محتوای ریزی دانه‌ها (BC_L) در امتداد لایه جریان، به‌دلیل اثر غربال‌گری، به‌طور غیرخطی با روند کاهنده‌ای کاهش می‌یابد. این رویه در کاهش ریزدانه‌ها در راستای شعاعی سیلو با نتایج حاصل از تحقیق Shinohara و همکاران (۲۰۰۱) و Jayas و همکاران (۱۹۸۷) مطابقت دارد. مقدار BC_L در ابتدای لایه جریان (مرکز سیلو) بیشترین است و مادامی‌که خطوط جریان به‌صورت شعاعی از یکدیگر فاصله می‌گیرند ریزدانه‌ها نیز از یکدیگر دور می‌شوند. به علت اثر غربال‌گری، مقادیر زیادی از ریزدانه‌ها در قسمت‌های نزدیک به مرکز سیلو بر جای می‌مانند و این باعث می‌شود که میزان تغییر BC_L بین بخش‌های ۱ و ۲ کمتر از میزان تغییر بین بخش‌های ۲ و ۳ و همچنین بین بخش‌های ۳ و ۴ باشد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در آنالیزهای سه‌بعدی فرآیند پر شدن سیلو، میزان BC_I تقریباً میانگین وزنی از مقادیر BC_L نقاط نمونه‌برداری است که در طول شعاع سیلو اندازه‌گیری می‌شود. نقاط نمونه‌برداری که از مرکز سیلو دورتر هستند وزن بیشتری نسبت به سایر نقاط دارند (به‌عنوان مثال در شکل ۵ (b)، نقطه A دارای بالاترین وزن است و نقطه O دارای کمترین وزن است). با توجه به شکل ۵ (c)، وزن نقاط نمونه‌برداری C، B و A تعداد حلقه‌های کوچک (هم‌اندازه با شعاع ظرف نمونه‌گیر) است که می‌توانند بر روی دایره‌های نقطه‌چین C'، B' و A' چیده شوند. بنابراین، وزن در نقطه O، C، B و A به‌ترتیب ۱، ۶، ۱۳ و ۲۰ خواهد بود. به‌عنوان مثال، در شکل ۶، میانگین وزنی BC_L برای حلقه ۱برابر است با: ٪۸/۱ = ۴۰ /((۲۰ × ٪۲/۳) + (۱۳ × ٪۱۱/۸) + (۶ × ٪۱۷/۷) + (۱ × ٪۱۹/۱)) که تقریباً برابر با میزان BC_I، یعنی ٪۷/۵ است. می‌توان نتیجه گرفت که در یک سیلو که از وسط پر می‌شود، می‌توان از میانگین وزنی مقادیر BC_L نقاط نمونه‌برداری که در طول شعاع سیلو اندازه‌گیری می‌شود برای تعیین محتوای اولیه ریزی دانه‌ها استفاده نمود.

تأثیر ارتفاع (Z)

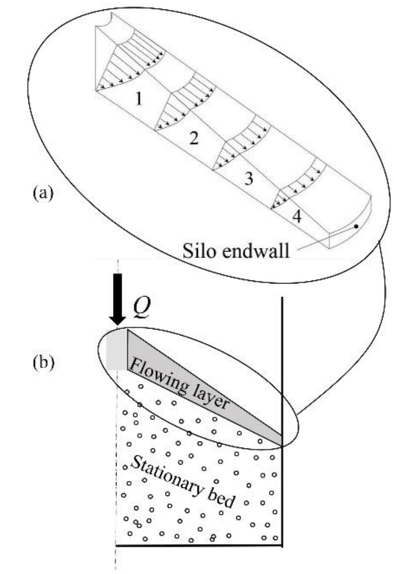
همانطور که در شکل ۶ دیده می‌شود، هنگامی که Z کاهش می‌یابد، روند کاهنده نمودارهای پخش ریزدانه‌ها کاهش می‌یابد (تقریباً به سمت خطی بودن میل می‌کنند). شکل ۸ نشان می‌دهد که در R=۰، R=۰/۲۸ و R=۰/۵۶ با افزایش Z میزان BC_L به‌طور خطی افزایش می‌یابد. اما روند متفاوتی برای نقطه R=۰/۸۴ وجود دارد. در نقطه مذکور BC_L با افزایش Z کاهش می‌یابد. بر اساس داده‌های جدول ۳، NUF_R با افزایش ارتفاع (Z) افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، در آزمایش ۱، تغییر Z از ۰/۲۱ به ۰/۷۹ باعث افزایش NUF_R از ٪۷۷/۹۵ تا ٪۱۶۲/۸۷می‌شود. این بدان معنی است که در ارتفاع‌های بالاتر مواد داخل سیلو، مقدار کمتری از ریزدانه‌ها به سمت دیواره‌های سیلو منتقل می‌شود. دلیل این امر این است مادامی‌که سیلو در حال پرشدن است ارتفاع مواد ریخته شده در درون سیلو افزایش می‌یابد در نتیجه فاصله سقوط آزاد مواد در حال ریزش کمتر می‌شود که در نتیجه کم شدن این فاصله نیروی برخورد جریان در حال سقوط با بستر ثابت مواد کمتر می‌شود (Fan *et al.*, 2017) و این امر باعث می‌شود باعث می‌شود که سرعت مواد در طول لایه جریان کمتر شود و درنتیجه ذرات ریز کمتری به دیواره سیلو برسد.

1- Gradually expanded channel



شکل ٦- پروفیل توزیع BC_L در راستای شعاعی سیلو در ارتفاع‌های مختلف درون سیلو (BC_I= 7.5%، Q= 0.5 lit s^{-1} و D_F= 84 mm)

Fig. 6. Distribution profile of local BCFM (BC_L) along radial direction at different heights (related to BC_I = 7.5%, Q = 0.5 lit s^{-1} and D_F = 84 mm)



شکل ۷- (a) نمای سه بعدی یک قطاع از لایه جریان، (b) نمای کناری از لایه جریان. پیکان‌ها بزرگی بردارهای سرعت را نشان می‌دهند.

Fig. 7. (a) A 3D view of a sector from flowing layer, (b) side view of flowing layer, where arrows indicate velocity magnitude of materials through flowing layer

جدول ۳- مقادیر NUF_R و NUF_S در شرایط مختلف آزمایشگاهی

Table 3- The values of NUF_R and NUF_S at different experimental conditions

No.	BC_I (%)	Q (kg m^{-3})	D_F (mm)	Z	NUF_R	NUF_S
1	5	0.5	84	0.79	162.87	122.16[a]
				0.64	144.02	
				0.50	124.13	
				0.35	101.83	
				0.21	77.95	
2	5	0.5	105	0.79	159.64	119.57
				0.64	142.05	
				0.50	123.64	
				0.35	98.22	
				0.21	74.31	

3	5	0.5	120	0.79	145.44	110.35
				0.64	135.48	
				0.50	116.89	
				0.35	92.15	
				0.21	61.81	
4	7.5	0.5	105	0.79	100.45	78.80
				0.64	91.57	
				0.50	80.88	
				0.35	67.28	
				0.21	53.81	
5	7.5	1	105	0.79	94.23	72.61
				0.64	85.98	
				0.50	74.89	
				0.35	61.26	
				0.21	46.71	
6	7.5	1.5	105	0.79	78.23	53.57
				0.64	67.98	
				0.50	55.19	
				0.35	40.47	
				0.21	26.00	
7	5	1.5	84	0.79	111.92	80.77
				0.64	98.91	
				0.50	83.01	
				0.35	65.90	
				0.21	44.10	
8	7.5	1.5	84	0.79	82.33	56.56
				0.64	71.96	
				0.50	57.62	
				0.35	42.68	
				0.21	28.23	
9	10	1.5	84	0.79	63.17	47.15
				0.64	56.01	
				0.50	47.74	
				0.35	38.53	
				0.21	30.28	
10	7.5	1	84	0.79	100.45	78.80
				0.64	91.57	
				0.50	80.88	
				0.35	67.28	
				0.21	53.81	
11	7.5	1	120	0.79	86.62	59.53
				0.64	74.24	
				0.50	59.77	
				0.35	45.96	
				0.21	31.09	
12	10	0.5	120	0.79	84.61	63.71
				0.64	79.71	
				0.50	70.53	
				0.35	51.72	
				0.21	31.96	
13	10	1	120	0.79	67.40	45.33
				0.64	56.57	
				0.50	44.77	
				0.35	34.62	
				0.21	24.29	
14	10	1.5	120	0.79	50.40	36.97[b]
				0.64	45.11	
				0.50	38.73	
				0.35	29.39	
				0.21	21.22	

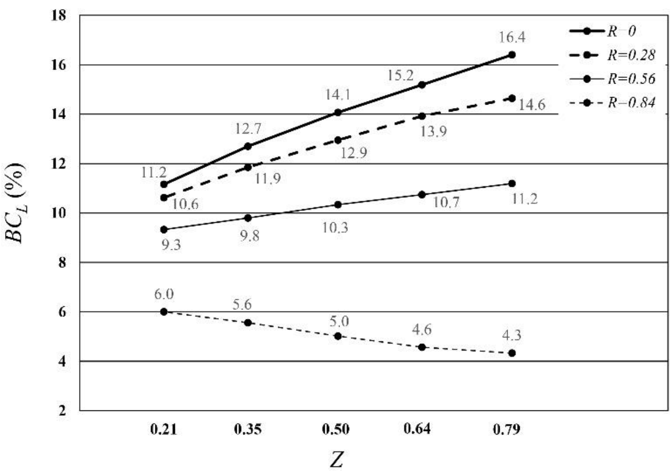
[a]: بیشترین مقدار شاخص غیریکنواختی سیلو در پخش ریزدانه‌ها

[b]: کمترین مقدار شاخص غیریکنواختی سیلو در پخش ریزدانه‌ها

[a]: Maximum value of NUF_S

[b]: Minimum value of NUF_S

بر این اساس همـانطور کـه Engblom و همکـاران (۲۰۱۲) نیـز اظهار داشته‌اند، در ارتفاع‌هـای بـالاتر (فاصلـه سـقوط کمتـر) میـزان کمتری از ریزدانه‌ها می‌توانند به انتهای لایـه جریـان (دیـواره سـیلو) برسند. این امر موجب کاهش یکنواختی پخش ریزدانـه‌هـا در امتـداد شعاع سیلو می‌شود.



شکل ۸– میانگین BC_L در ارتفاع‌های مختلف

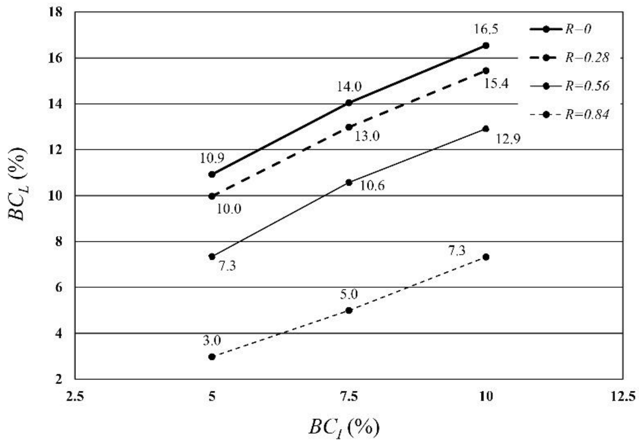
Fig. 8. Mean of local BCFM (BC_L) at different heights

تأثیر میزان محتوای اولیه ریزی دانه‌ها (BC_I)

شکل ۹ تغییرات BC_L را از R=۰ تا R=۰/۸۴ در سه سـطح BC_I نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود میزان BC_L با افـزایش BC_I افزایش می‌یابد. اما نکته اینجاست: NUF_S بـا افـزایش BC_I کـاهش می‌یابد (در جدول ۳، آزمـایش ۷ تـا ۹، افـزایش BC_I از ۵٪ بـه ۱۰٪ منجر به کاهش NUF_S از ۸۰/۷۷٪ به ۴۷/۱۵٪ می‌شود). دلیـل ایـن امر این است که در BC_I بالاتر (کثرت ریزدانه‌ها)، تمام ریزدانـه‌هـا در لایه جریان نمی‌توانند به لایه‌های زیرین (فضـای موجـود بـین ذرات درشت‌تر) نفوذ کنند و بسیاری از آنها همراه با مواد درشت‌تر به سـمت دیواره سیلو هدایت می‌شوند. به عبارت دیگر، در مقـادیر بـالای BC_I اثر غربال‌گری کمتر است. عـلاوه بـر مطالـب یادشـده مـی‌تـوان بـه موضوع دیگر نیز اشاره نمود: هرچه ذرات داخل سیلو ریزتـر باشـد (یـا میزان ریزدانه‌ها بیشتر باشد) کپه تشکیل شده شیب تنـدتری بـه‌خـود خواهد گرفت و این باعث جریان روان‌تر مـواد در طـول لایـه جریـان می‌شود. بنابراین، ریزدانه‌ها لابه‌لای مواد درشت‌تر می‌توانند به فاصله دورتری از مرکز سیلو هدایت شوند. از مطالب فـوق مـی‌تـوان نتیجـه گرفت که اثر غربال‌گری در مقادیر کمتر BC_I، بیشتر از اثر غربال‌گری در مقـادیر بیشتـر BC_I اسـت. ایـن نتـایج بـا نتـایج بـه‌دسـت آمـده توسط Shinohora و همکـاران (۲۰۰۱)، Schulze (۲۰۰۸) و Jain و همکاران (۲۰۱۳) همخوانی دارد. به‌طور کلی می‌توان گفت که پخش ریزدانه‌ها در سیلوهای دارای مقادیر بیشتر BC_I، نسبت بـه سـیلوهای دارای مقادیر کمتر BC_I، یکنواخت‌تر است. اما لازم به ذکر اسـت کـه علی‌رغم نتایج فوق، وجود مقادیر زیاد ریزدانه‌هـا در داخـل سـیلوهای نگهداری محصولات دانه‌ای کشاورزی بسیار نامطلوب است.

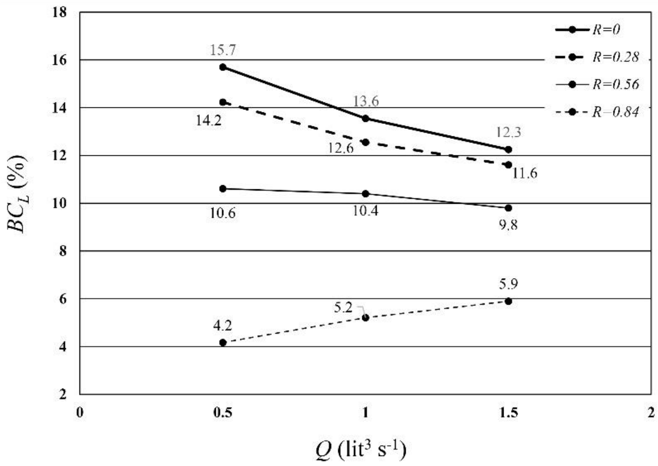
تأثیر دبی ورودی

شکل ۱۰ نشان می‌دهد چگونگی تأثیر دبی ورودی محصول را بر BC_L نشان می‌دهد. در R=۰، R=۰/۲۸ و R=۰/۵۶، BC_L با افـزایش دبی ورودی محصول کاهش می‌یابد، اما در R=۰/۸۴، BC_L با افزایش دبی ورودی محصول افزایش می‌یابد. این بـدان معنـی اسـت کـه در دبی‌های بالاتر مقادیر زیادی از ریزدانه‌ها به سمت دیـواره‌هـای سـیلو منتقل می‌شود. همانطور که در شکل ۱۱ دیده مـی‌شـود، بـا افـزایش دبی، پخش ریزدانه‌ها یکنواخت تر می‌شود. نتایج نشان داد که NUF_S با افزایش دبی کاهش می‌یابد (به‌عنوان مثال در جدول ۳، آزمـایش ۴ تا ۶، با افزایش دبی ورودی از ۰/۵ تـا ۱/۵ لیتـر بـر ثانیـه، NUF_S از ۷۸/۸۰٪ به ۵۳/۵۷٪ کاهش می‌یابد). Fan و همکاران (۲۰۱۷) اظهار داشتند که ذرات ریز در هنگام برخورد با ذرات بزرگ‌تر (ماننـد زمـانی که یک توپ تنیس با یک توپ بسکتبال برخورد می‌کنـد) بـه سـمت دیواره سیلو پرتاب می‌شوند. این امر در دبی‌های بالاتر بیشتر به چشم می‌خورد. هرچه دبی افزایش یابد لایـه جریـان ضـخیم‌تـر مـی‌شـود (Koeppe *et al.*, 1998; Schulze, 2008; Fan *et al.*, 2002) و باعث می‌شود ریزدانه‌ها قبل از اینکه بتوانند به لایه‌های زیـرین نفـوذ کنند، در حین حرکت در درون لایه جریان به سمت دیواره‌های سـیلو هدایت شوند.



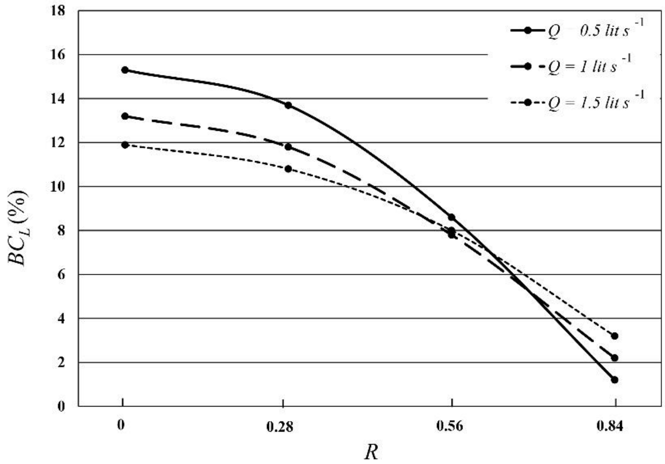
شکل ۹- میانگین BC_L در سطوح مختلف از محتوای اولیه ریزی دانه‌ها

Fig. 9. Mean of local BCFM (BC_L) as influenced by different levels of initial BCFM



شکل ۱۰- میانگین BC_L در سطوح مختلف از دبی ورودی محصول

Fig. 10. Mean of local BCFM (BC_L) as influenced by different volume flow rate

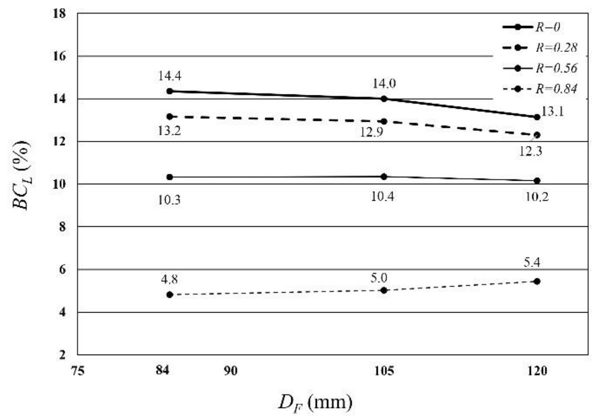


شکل ۱۱- پروفیل توزیع BC_L در راستای شعاعی سیلو در سطوح مختلف از دبی ورودی محصول ($BC_I = 5\%$، $D_F = 84$ mm و $Z = 0.79$)

Fig. 11. Distribution profile of local BCFM (BC_L) along radial direction in silo as influenced by different volume flow rates (related to $BC_I = 5\%$, $D_F = 84$ mm and $Z=0.79$)

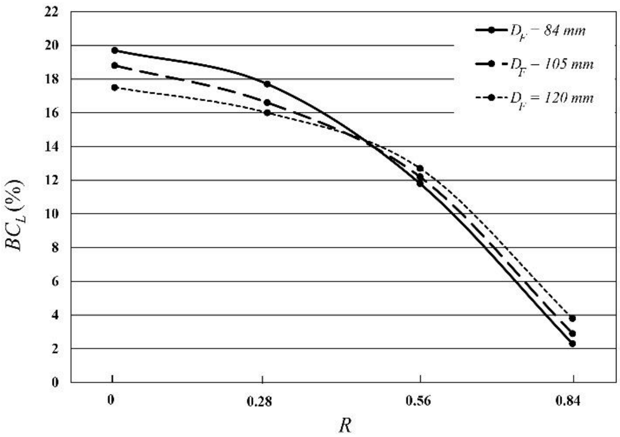
تأثیر قطر لوله پرکننده

همانطور کـه در شـکل ۱۲ نشـان داده شـده در R=۰، R=۰/۲۸ و R=۰/۵۶ BC_L به صورت خطی با افزایش قطر لوله پرکننـده کـاهش پیدا می‌کند، اما در R=۰/۸۴ BC_L با افزایش قطر لوله به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. شکل ۱۳ نشان مـی‌دهـد کـه پخـش ریزدانـه‌هـا در لوله‌های بزرگ‌تر یکنواخت‌تر اسـت. Engblom و همکـاران (۲۰۱۲) نیز مشاهده نمودند که با افزایش قطر لوله ورودی مقـادیر بیشـتری از ریزدانه‌ها به دیواره سیلو می‌رسند. به عبارت دیگر، NUF_S با افـزایش قطر لوله کاهش می‌یابد (به‌عنوان مثال در جدول ۳، آزمایش ۱ تـا ۳، با افـزایش قطـر لولـه پرکننـده از ۸۴ تـا ۱۲۰ میلـی متـر، NUF_S از ٪۱۲۲/۱۶ به ٪۱۱۰/۳۵ کاهش می‌یابد). در شکل ۱۴ تأثیر قطر لولـه بر روی شکل کپه به تصویر کشیده شده است. لوله بـزرگ‌تـر باعـث می‌شود که ضلع بالایی کپه تشکیل شده بـزرگ‌تـر (بـه دلیـل سـطح ریزش بزرگتر محصول) و ارتفاع آن کوتاه‌تر شود. به بیان دیگر هرچه قطر لوله افزایش یابد طول غربال‌گری کمتر می‌شود و باعـث پخـش یکنواخت‌تر ریزدانه‌ها می‌شود. از نقطه نظر دیگر، از آنجایی‌که جریـان مواد در لوله‌های بزرگ‌تر روان‌تر است (تلفات انرژی کمتـر)، بنـابراین جریان مواد در حین حرکت در لایـه جریـان، انـرژی بیشـتری بـرای رسیدن به دیواره سیلو دارند که منجر به یکنـواختی بیشـتر در پخـش ریزدانه‌ها می‌شود. از دیگر نکات مشهود در شکل ۱۲ و مقادیر NUF_S در جدول ۳ این است که میزان تغییر در BC_L تحـت تـأثیر تغییـر در قطر از ۸۴ به ۱۰۵ میلی‌متر کمتر از میزان تغییر در BC_L تحـت تـأثیر تغییر در قطر از ۱۰۵ به ۱۲۰ میلی‌متر است. این نشـان مـی‌دهـد کـه یکنواختی در پخش ریزدانه‌ها به‌طور فزاینده‌ای با افـزایش قطـر لولـه افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش قطر لوله، سـطح مقطـع لولـه (سـطح ریزش محصول بر روی پشته) به‌طور فزاینده‌ای افزایش می‌یابد.



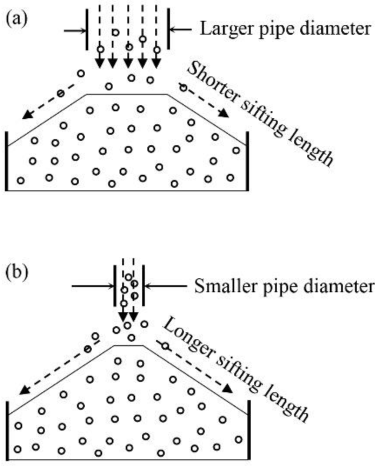
شکل ۱۲- میانگین BC_L در قطرهای مختلف لوله پرکننده

Fig. 12. Mean of local BCFM (BC_L) as influenced by different fill pipe diameter



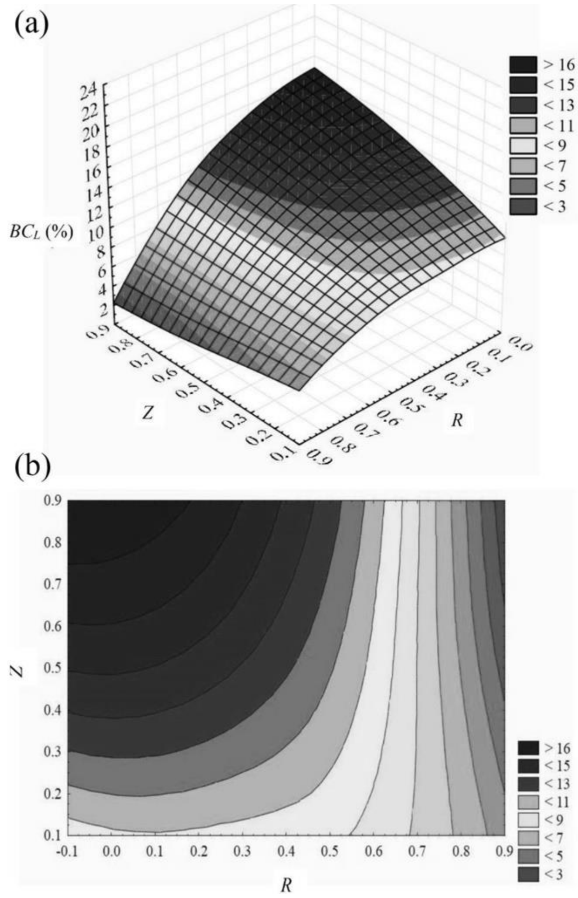
شکل ۱۳- پروفیل توزیع BC_L در قطرهای مختلف لوله پرکننده (BC_I = 7.5%، Q = 0.5 lit s^{-1} و Z = 0.79)

Fig. 13. Distribution profile of local BCFM (BC_L) at different fill pipe diameter (related to BC_I=7.5%, Q=0.5 lit s^{-1} and Z=0.79)



شکل ١٤– تأثیر قطر لوله پرکننده بر توزیع ریزدانه‌ها

Fig. 14. Effect of fill pipe diameter on fine (BC_L) distribution



شکل ١٥– نحوه توزیع ریزدانه‌ها در سیلو بعد از پرشدن (R^2=۰/۹۴)، (a) نمودار رویه‌ای (b) نمودار کانتور

Fig. 15. Prediction of fine (BC_L) distribution in silo after filling, (a) Surface plot (b) Contour plot

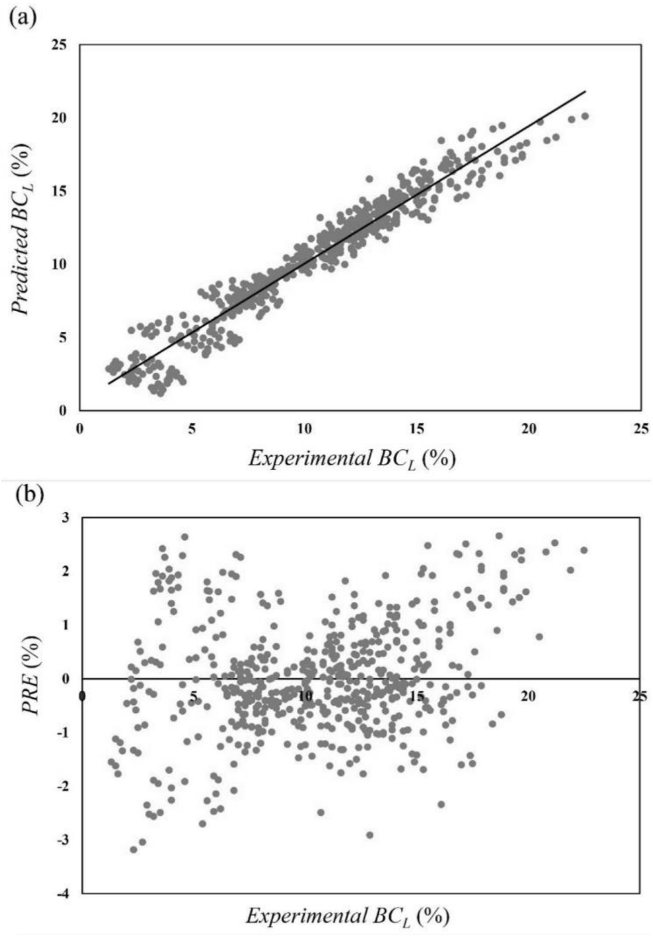
همانطور که در جدول ۳ گزارش شده است، یکنواخت‌ترین حالت در پخش ریزدانه‌ها در آزمایش شماره ۱۴ رخ داده است که در آن کمترین مقدار NUF_S (۳۶/۹۷٪) به‌دست آمده است. همچنین بیشترین مقدار NUF_S مربوط به آزمایش ۱ یعنی ۱۲۲/۱۶٪ می‌باشد. همچنان‌که که قبلاً هم اشاره شد، اگرچه NUF_S با افزایش BC_I کاهش می‌یابد، ولی وجود مقادیر زیاد BC_I در سیلوهای نگهداری

محصـولات دانـه‌ای کشـاورزی نـامطلوب اسـت. شـکل ۱۵ پخـش ریزدانه‌ها را در تمامی آزمایش‌ها نشان مـی‌دهـد. بـرای تجسـم بهتـر تعامل بین R و Z، داده‌ها به دو صورت، نمـودار رویـه‌ای[۱] (شـکل ۱۵ (a)) و نمودار کانتور[۲] (شکل۱۵ (b)) ترسیم شـده‌انـد. نمودارهـا نشـان می‌دهند که چگونه BC_L با تغییر تک به تک یا همزمان R و Z تغییـر می‌کند. همانطور که در نمودارها نیز قابل مشاهده است، تمرکز قابـل توجه ریزدانه‌ها در مرکز سیلو رخ داده است کـه ایـن تمرکـز نیـز بـا افزایش Z افزایش می‌یابد. کمترین میزان تمرکز ریزدانه‌هـا در دیـواره سیلو به‌خصوص در سطوح بالاتر Z رخ داده اسـت. ایـن بـدان معنـی است که حداکثر غیریکنواختی در پخش ریزدانه‌ها در سطوح بـالاتر Z رخ می‌دهد.

جدول ۴- ثوابت مدل پیشنهادی برای توزیع ذرات

Table 4- Constants of the distribution model

	ثوابت **Constant**							
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8
مقدار Value	1.05	-1.283	-0.011	23.335	9.624	-17.17	-13.577	20.727



شکل ۱٦– (a) مقایسه بین مدل پیشنهادی و داده‌های تجربی (R^2=۰/۹۴) (b) توزیع خطای باقی‌مانده پیش‌بینی مدل جهت تخمین BC_L

Fig. 16. (a) Comparison between prediction of the developed model and experimental data (BC_L) and (b) distribution of PREs of the developed model for prediction of BC_L

1- Surface plot
2- Contour plot

مدل‌سازی پخش ریزدانه‌ها

اثر پارامترهای تـأثیرگـذار BC_I، Q، D_F، Z و R بـر روی پخـش ریزدانه‌ها را می‌توان از طریق معادله زیر بیان نمود:

$$BC_L = a_1BC_I + a_2Q + a_3D_F + a_4R + a_5Z + a_6\exp(R) + a_7ZR + a_8 \quad (۹)$$

ثابت‌های معادله در جدول ۴ ارائـه شـده اسـت. از میـان تمـامی مدل‌هایی که به روش سعی و خطا مورد بررسـی قـرار گرفتنـد، مـدل مذکور به‌عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب شد. مقادیر بـه‌دسـت آمـده برای شاخص‌های آماری R^2، χ^2، $RMSE$ و $MRDM$ به‌ترتیب ۰/۹۴، ۱/۱۴، ۱/۰۶، ۱۱/۳۹ گزارش شد. همانطور قبلاً ذکر شده BC_L تابعی غیرخطی از R و تابعی خطی از Z، BC_I، Q و D_F است. گرچه اضـافه نمودن جمله‌های بیشتر و پیچیده‌تر پیچیدگی مدل را افزایش می‌دهد، اما در مطالعه حاضر در نظر گرفتن BC_L به‌عنوان تـابع نمـایی از R و تابعی ضمنی Z و R (ZR) کیفیت مدل را به‌طور قابل تـوجهی بهبـود بخشید. جمله a_7ZR نشان‌دهنده تعامل قابل توجـه از ارتفـاع و شـعاع سیلو است. شکل ۱۶ (a) بـرازش بـین داده‌هـای تجربـی و داده‌هـای پیش‌بینی شده توسط مدل را نشان می‌دهد که حاکی از کیفیت بالای مدل است. شکل ۱۶ (b) توزیع خطای باقی‌مانده پیش‌بینی[1] (PRE) را برای مدل نشان می‌دهد. همانطور که از شکل برمی‌آید، مقادیر PRE به‌طور تصادفی توزیع شده‌اند و برای پخش آنها هیچ الگوی خـاص و منظمی (حساسیت) یافت نمی‌شوند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق پخش ریزدانه‌ها در فرآیند پرکردن سیلو تحت تأثیر عوامل مهمی چون، محتوای اولیه ریزی دانه‌ها، دبی ورودی محصول به سیلو و قطر لوله پرکننده سیلو در یـک محـیط آزمایشـگاهی مـورد بررسی قرار گرفت. یک رویکرد جدید برای اندازه‌گیری ریزدانـه‌هـا در امتداد شعاع و ارتفاع سیلو ارائه گردید. به کمک این روش، نمونه‌گیری بدون برهم‌زنی مواد در منطقه نمونه‌برداری انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در آنالیزهای سه‌بعدی فرآیند پر شدن سیلو، میـزان BC_I تقریباً میانگین وزنی از مقادیر BC_L نقاط نمونه‌بـرداری اسـت کـه در طول شعاع سیلو اندازه‌گیری می‌شود. مشـخص شـد کـه بـا افـزایش میزان محتوای اولیه ریزی دانه‌ها، دبی ورودی محصـول و قطـر لولـه پرکننده سیلو، میزان یکنواختی پخش ریزدانه‌ها افزایش می‌یابد. بـا در نظر گرفتن عوامل عوامل یاد شده، پخش ریزدانه‌ها با استفاده از یـک مدل ریاضی شبیه‌سازی گردید که نتایج به‌دست آمده از شاخص‌هـای آماری حاکی از کیفیت بالای مدل بود. آزمایش‌ها نشان داد که تمرکز قابل توجه ریزدانه‌ها در مرکز سـیلوها رخ مـی‌دهـد و ایـن تمرکـز بـا افزایش Z بیشـتر مـی‌شـود. کمتـرین میـزان تمرکـز ریزدانـه‌هـا بـه قسمت‌های نزدیک به دیواره سیلوهاست به‌خصوص در سطوح بـالاتر Z. این بدان معنی است که حداکثر غیریکنواختی در پخش ریزدانه‌هـا در سطوح بالاتر Z رخ می‌دهد.

References

1. Abbasi, S., S. Minaei, and M. H. Khoshtaghaza. 2014. Investigation of kinetics and energy consumption of thin layer drying of corn. Journal of Agricultural Machinery 4 (1): 98-107. (In Farsi).
2. ASABE. 2008. Moisture measurement- Unground grain and seeds. ASABE S352.2. St. Joseph, Michigan, USA: American Society of Agricultural and Biological Engineers.
3. Bartosik, R. E., and D. E. Maier. 2006. Effect of airflow distribution on the performance of NA/LT in-bin drying of corn. Transactions of the ASABE 49 (4): 1095-1104.
4. Combarros, M. G., H. J. Feise, S. Strege, and A. Kwade. 2016. Segregation in heaps and silos: Comparison between experiment, simulation and continuum model. Powder Technology 293: 26-36.
5. Engblom, N., H. Saxen, R. Zevenhoven, H. Nylander, and G. G. Enstad. 2012. Segregation of powder mixtures at filling and complete discharge of silos. Powder Technology 215-216: 104-116.
6. Fan, Y., K. V. Jacob, B. Freireich, and R. M. Lueptow. 2017. Segregation of granular materials in bounded heap flow: A review. Powder Technology 312: 67-88.
7. Fan, Y., P. B. Umbanhowar, J. M. Ottino, and R. M. Lueptow. 2013. Kinematics of monodisperse and bidisperse granular flows in quasi-two-dimensional bounded heaps. Proceedings of the Royal Society A, 469, 20130235.
8. Fan, Y., Y. Boukerkour, T. Blanc, P. B. Umbanhowar, J. M. Ottino, and R. M. Lueptow. 2012. Stratification, segregation, and mixing granular materials in quasi-two-dimensional bounded heaps. Physical Review E 86, 051305.
9. Jain, A., M. J. Metzger, and B. J. Glasser. 2013. Effect of particle size distribution on segregation in vibrated systems. Powder Technology 237: 543-553.

1- Prediction residual error

10. Jayas, D. S., S. Sokhansanj, E. B. Moyseyand, and E. M. Barber.1987. Distribution of foreign material in canola bins using a spreader or spout. Canadian Agricultural Engineering 29: 183-188.
11. Koeppe, J. P., M. Enz, and J. Kakalios. 1998. Phase diagram for avalanche stratification of granular media. Physical Review E 58, R4104-R4107.
12. Mohsenin, N. N. 1986. Physical Properties of Plant and Animal Materials. New York. Gordon and Breach Science Publisher.
13. Noyes, R., S. Navarro, and D. Armitage. 2002. Supplemental aeration systems. PP 413-488 in S. Navarro, & R. Noyes eds. The mechanics and physics of modern grain aeration management. Boca Raton: CRC Press.
14. Schulze, D. 2008. Powders and Bulk Solids - Behaviour, Characterization, Storage and Flow (chapter 13). Springer. Verlag Berlin Heidelberg.
15. Shinohara, K., B. Golman, and T. Nakata. 2001. Size segregation of multicomponent particles during the filling of a hopper, Advanced Powder Technology 10 (1): 333-343.
16. SPSS. 2012. SPSS/PC for IBM PC/XT, Version 1.10. SPSS Inc., Chicago, IL, USA,
17. Stephens, L. E., and G. H. Foster. 1976. Grain bulk properties as affected by mechanical grain spreaders, Transactions of ASAE 19 (2): 354-358.
18. Stroshine, R. 2004. Physical properties of agricultural materials and food products (Chapter 2). West Lafayette, Indiana.
19. USDA. 2013. Grain inspection handbook. Book II. Chapter 4. Corn. U.S. Department of Agriculture, Grain inspection, Packers and Stockyards Administration, Federal Grain Inspection Service.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 9, No. 1, Spring - Summer 2019, p. 31-48

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۹، شماره ۱، نیمسال اول ۱۳۹۸، ص ۴۸-۳۱

Appraisal of Fine Distribution in a Pilot-scale Silo in Different Filling Conditions

A. Nourmohamadi Moghadami[1]- D. Zare[2*]- Sh. Kamfiroozi[3]- A. Jafari[4]- M. A. Nematollahi[5]- R. Kamali[6]

Received: 30-12-2017
Accepted: 17-02-2018

Introduction

During filling a silo, granular material containing a range of particle sizes, the fine material accumulates under the filling point. The inclined surface of stationary bed particle which is formed in silos during filling process acts similar to a sieve through which the smaller particle fall. This effect is called *sifting*. As a result of the mentioned effect, much finer particles form a vertical cylindrical zone of high concentration at the silo center. For optimal design in industrial process such as aeration of stored products in silos, filling silos, and wherever granular materials are handled, it is necessary to survey the distribution of the fine materials depending on product and process properties. The objectives of present study were: (a) To study fine change as affected by substantial parameters, (b) To model fine changes at different conditions in silos.

Materials and Methods

In the present study, an experimental setup consist of a main container, elevator, trapezoidal container and experimental silo was designed and built. Fine content was defined by BCFM (broken corn and foreign material). By applying a new approach, sampling was performed in a radial and vertical direction. The position of each sampling point was determined with a scaled distance from center (R) and from bottom (Z). Local BCFM (BC_L) was defined as the value of BCFM in each sampling point. Influential parameters namely, initial BCFM (BC_I), volume flow rate (Q) and fill pipe diameter (D_F) were considered as treatments. Non-linear regression technique was applied on the experimental data to predict the distribution pattern of fines into the pilot-scale silo. The most appropriate model in a try and error procedure was selected based on highest value of R^2 and least value of χ^2, *RMSE* and *MRDM*.

Results and Discussions

According to the results of ANOVA, it was found that the effects of all parameters were significant at 5% probability. BC_L decreased nonlinearly with a concave down decreasing trend along radial direction due to sifting effect. As a result, most amount of fines remained in the sections closer to the center of the silo. Fine distribution became more uniform with decreasing Z and increasing BC_I and D_F. Also, the distribution of fine became more uniform with increasing Q. BC_L was a nonlinear function of R and a linear function of Z, BC_I, Q and D_F. Although including more and complex terms increased the model complexity but in the present study considering BC_L as an exponential function of R and as an implicit function of Z and R (ZR) improved the quality of the model significantly. The values of 0.94, 1.14, 1.06, 11.39 for R^2, χ^2, *RMSE* and *MRDM*, respectively, gave the best model. The results showed, considerable accumulation of fines occurred at the center of the silo which increased with increase of level of Z. Also, low concentration of fine occurred at the periphery of the silo especially at higher levels of Z. It means that maximum non-uniformity of fine distribution occurred at higher levels of Z.

1- Ph.D. Student, Biosystems Engineering Department, College of Agriculture, Shiraz University
2- Associate Professor, Biosystems Engineering Department, College of Agriculture, Shiraz University
3- Undergraduate Student, Biosystems Engineering Department, College of Agriculture, Shiraz University
4- Associate Professor, Biosystems Engineering Department, College of Agriculture, Shiraz University
5- Assistant Professor, Biosystems Engineering Department, College of Agriculture, Shiraz University
6- Professor, Mechanical Engineering College, Shiraz University
(*- Corresponding Author Email: dzare@shirazu.ac.ir)

Conclusions

The present study investigated distribution of fines during filling affected by main parameters namely, initial BCFM, volume flow rate and fill pipe diameter in a pilot scale silo. A new procedure was developed for measuring the fine material along radial and vertical directions. Distribution of fine was modeled using a developed equation considering the effects of main parameters. The results showed that distribution of fine becomes more uniform with decreasing height and increasing initial BCFM, volume flow rate and fill pipe diameter.

Keywords: Corn, Filling method, Fine distribution pattern, Material flow, Nonlinear model, Silo